

Сравнение выходных характеристик

	Симуляция	ТЭЦ
Мощность ГТ (МВт)	175	172
Мощность ПТ (МВт)	69	67
Температура после ГТ (°С)	523	520-530
Температура после конденсатора (°С)	26	25

4. *Результаты исследования.* Осуществлено моделирование внутростанционных процессов в программе Aspen Plus. Все входящие характеристики были взяты с действующей станции ТЭЦ. Расхождение в полученных данных можно считать минимальными. Установлено, что программа позволяет проводить математическое моделирование термодинамических процессов. В дальнейшем будет произведен перевод схемы с природного газа на синтез газ с добавлением узлов газификации и анализа технологии.

Список использованных источников

1. Alstom GT13E2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dm.energy.ru/alstom-gt13e2>
2. Ольховский Г.Г. Газотурбинные и парогазовые установки сегодня // Электрические станции. 2015. № 1.
3. ТЭЦ «Академическая» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tplusgroup.ru/org/sverdlovsk/organization/tehc-akademicheskaja/>
4. Ольховский Г.Г., Трушечкин В.П. Перспективы повышения экономичности ГТУ и ПГУ // Электрические станции. 2013. № 1.
5. Ольховский Г.Г. Перспективные газотурбинные и парогазовые установки для энергетики (обзор) // Теплоэнергетика. 2013. № 2.

УДК 669.041

В. Г. Лисиенко, Г. К. Маликов, А. А. Титаев

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК В НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Аннотация

В статье дано сравнение двух перспективных методов моделирования теплообмена в нагревательных печах: метода конечных объемов и зонального метода. В качестве примера использования каждого из этих методов было выполнено моделирование нагрева непрерывнолитой заготовки в кольцевой нагревательной печи. Результаты моделирования

показали, что оба метода дают схожую точность получаемой величины нагрева (отличия не превышают 50 °C). При этом метод конечных элементов требует для своей работы на 13 % больше времени, чем зональный метод.

Ключевые слова: нагревательные печи, теплообмен излучением, зональный метод, метод конечных объемов.

Abstract

The article gives a comparison of two promising methods for modeling heat transfer in heating furnaces: the finite volume method and the zonal method. As an example of using each of these methods, we simulated the heating of a continuously cast billet in an annular heating furnace. The simulation results showed that both methods give a similar accuracy of the resulting heating value (the differences do not exceed 50 °C). At the same time, the finite element method requires for its work 13 % longer time than the zonal method.

Key words: heating furnaces, heat exchange by radiation, zonal method, finite volume method.

Введение. В настоящее время широкое развитие получило использование методов математического моделирования применительно к энергоемким металлургическим процессам, в частности – к нагревательным печам. К настоящему времени сложилось несколько подходов к моделированию теплового излучения в термических печах. Коммерческие программы, сочетающие в себе расчет теплообмена излучением с расчетом гидродинамики, горения и других физических процессов, как правило, используют конечноэлементные методы: метод дискретных ординат (DOM), метод конечных объемов (FVM) и т.п. Особенность этих методов заключается в однократном полном расчете всех потоков тепла в системе, исходя из жестко заданных граничных условий. При изменении хотя бы одного граничного условия расчет необходимо полностью проделывать заново, что, вместе с необходимостью разбивать рабочий объем сеткой достаточно мелкого масштаба, делает данные методы требовательными к времени расчета и компьютерным мощностям. Другой подход состоит в разбиении всех поверхностей и рабочего объема системы на относительно небольшое число зон с дальнейшим получением для данного разбиения некоторой промежуточной характеристики, инвариантной к части граничных условий. Такой характеристикой, как правило, является матрица размерности $N \times N$ (где N – число выделенных зон), называемая матрицей обобщенных угловых коэффициентов излучения (в англоязычной литературе для аналогичных целей введена матрица прямых взаимных поверхностей (Direct Exchange Area Matrix – DEA). Данная матрица, будучи вычисленной однократно, существенно упрощает дальнейшее вычисление тепловых потоков в системе для различных наборов граничных условий. Это позволяет вычислить матрицу обобщенных угловых коэффициентов один раз, и в дальнейшем проводить быстрые расчеты с различными наборами граничных условий. Например, нахождение неизвестных температур зон в системе уравнений теплового баланса. Таким образом, преимуществами методов конечных элементов являются простота программирования, использование той же сетки элементов, что и для методов расчета гидродинамики и горения. Однако, данные методы не оптимизированы для многократных вычислений с различными граничными условиями. Преимуществами зонального метода являются его вычислительная точность, а также сокращение вычисления для расчета при изменении граничных

условий (граничных потоков или температур). К недостаткам данного метода можно отнести то, что он требует построения отдельной упрощенной сетки зон, а также повышенную вычислительную сложность определения обобщенных угловых коэффициентов, зависящих как от геометрических соотношений, так и от физических параметров (концентраций веществ и температуры печной атмосферы).

В работе рассмотрено сравнение двух методов моделирования теплообмена: метода конечных объемов (FVM) [1] и усовершенствованного зонального метода (DTZM) [1]. В качестве объекта моделирования была выбрана печь нагрева непрерывнолитых заготовок с вращающимся подом.

Теоретическое описание методов

Метод конечных объемов. Данный метод описан достаточно подробно в ряде зарубежных [1], а также отечественных источников. В его основе лежит решение уравнения теплового баланса для небольшой ячейки пространства (конечного объема) P для каждого из пространственных направлений. В качестве известных величин берутся ранее рассчитанные интенсивности излучения на границах данного объема I_x , I_y , I_z , а также излучение источников, расположенных внутри данного объема b_P . В качестве неизвестной величины выступает интенсивность излучения внутри объема P I_P . Общий вид уравнения для конечного объема:

$$a_P I_P = a_x I_x + a_y I_y + a_z I_z + b_P, \quad (1)$$

где a_P , a_x , a_y , a_z – коэффициенты, определяемые геометрической конфигурацией конечного объема и выбранным направлением излучения.

Основная вычислительная трудность метода состоит в определении коэффициентов в уравнении (1), а также решении систем таких уравнений для всех ячеек разбиения печного пространства параллельно.

Коэффициенты для ортогонального объема размером $(\Delta x) \times (\Delta y) \times (\Delta z)$ и выбранного направления l в общем случае вычисляются по формулам:

$$a_P = \Delta y \Delta z |D_x^l| + \Delta x \Delta z |D_y^l| + \Delta x \Delta y |D_z^l| + \Delta x \Delta y \Delta z \Omega^l; \quad (2)$$

$$a_x = \Delta y \Delta z |D_x^l|, a_y = \Delta x \Delta z |D_y^l|, a_z = \Delta x \Delta y |D_z^l|, \quad (3)$$

где значения D_x^l , D_y^l , D_z^l определяются выбранным направлением l и телесным углом распространения излучения Ω^l .

В общем случае, когда температуры (а значит и интенсивности) неизвестны, для получения температурного поля требуется итерационный процесс перевычисления интенсивностей по формулам (1)-(3).

Усовершенствованный зональный метод. Зональный метод традиционно используется для расчета тепловых режимов в металлургических печах. Свое развитие он получил в работах группы под руководством Лисиенко В.Г. [2-4].

В зональном методе можно выделить несколько характерных этапов:

1. Выделение в системе поверхностных и объемных зон, характеризующихся в первом приближении постоянными физическими параметрами внутри зоны (температура, коэффициенты поглощения и отражения и т.п.)

2. Присвоение каждой из зон системы присущих ей оптических свойств (степень черноты для поверхностных зон, коэффициент поглощения для объемных зон) на основании принятых моделей излучения поверхностей твердых тел и газов.

3. Вычисление матрицы обобщенных угловых коэффициентов на основании геометрического взаиморасположения зон и их оптических свойств с помощью численного определения по формуле:

$$\psi_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} e^{-\tau(dA_j, dA_i)} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi L^2} dA_j dA_i, \quad (4)$$

где dA_i и dA_j – элементарные площадки, выделенные на поверхности зон i и j ; A_j и A_i – площади поверхности зон i и j ; θ_i и θ_j – углы между нормальными к поверхности зон и лучем, связывающим их между собой; $\tau(dA_j, dA_i)$ – оптическая толщина слоя среды на пути луча между площадками dA_i и dA_j .

4. В случае присутствия в системе отражающих поверхностей вычисление матрицы обобщенных разрешающих угловых коэффициентов, учитывающих переотражения излучения в системе.

5. Вычисление потоков на каждую из поверхностных и объемных зон на основании полученных величин.

Для получения достоверной картины распределения тепловых потоков, поступающих к трубам в каждый момент времени в печи, необходимо максимально точное определение принятых в модели параметров, влияющих на теплоперенос. Так как основным источником тепла в печи является сжигаемое в горелках топливо, то особое внимание необходимо уделить составу газовой смеси, образуемой в процессе горения. Для природного газа продукты сгорания представляют собой смесь диоксида углерода и водяных паров ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$). Эти газы являются основными излучающими компонентами атмосферы печного пространства, а их высокая температура и значительный объем делает их одним из основных источников излучения в печи в целом. Ключевой характеристикой, определяющей степень излучения печной атмосферы, является коэффициент поглощения k , который может быть получен из выражения:

$$k(T, p_{\text{CO}_2}, p_{\text{H}_2\text{O}}) = \frac{1}{L} \ln \left(1 - \varepsilon(T, p_{\text{CO}_2}, p_{\text{H}_2\text{O}}) \right), \quad (5)$$

где ε – интегральная степень черноты рассматриваемого объема газовой смеси; L – длина характеристического пути луча в данном объеме.

Учитывая сильную зависимость параметра ε от состава газовой смеси, геометрической конфигурации занимаемого газом объема и температуры газа, его определение сопряжено со значительными вычислительными трудностями, вызванными существенным изменением температур и состава газа как в различных точках печного пространства так и в различные моменты времени в процессе сгорания топлива. В данной работе для вычисления зональным методом определение коэффициента поглощения было проведено с помощью алгоритма экспоненциальных широких полос поглощения (EWBM), что

позволило достичь точности результатов, сравнимой с точностью при вычислении FVM методом.

Параметры и моделирование объекта. В качестве объекта моделирования была выбрана кольцевая печь (КП) трубопрокатного цеха №1 ОАО «Северский Трубный Завод» (г. Полевской) ТПЦ-1 Основные конструктивные и режимные параметры КП приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные конструктивные и режимные параметры кольцевой печи.

Показатель	Величина, ед. изм.
Средний диаметр	24 м
Длина печи по средней линии	70,7 м
Ширина рабочего пространства	5,2 м
Высота рабочего пространства	2,04 м
Диаметр слитка	290-360 мм
Длина слитка	2300- 4500 мм
Вес	933 – 3596 кг
Количество заготовок в печи	122 заготовки
Расположение заготовок	однорядное
Производительность печи	До 90 т/ч
Температура нагрева	1200 - 1300
Число зон регулирования	5 + 1 не отапливаемая
Количество горелок	56
Температура подогрева воздуха	450-500
Максимальный расход газа	5400 м ³ /ч

Необходимость моделирования режимов работы данной печи была вызвана установкой в процессе капитального ремонта печи инновационной конструкции пода печи: а именно в соответствии с патентом на полезную модель RU 128301 U1 “Устройство подины кольцевой нагревательной печи” (приоритет от 12.11.2012) [5] предложено усовершенствование подины печи, состоящее в установке на нее продольных выступов шириной 290мм и высотой 60мм, отстоящих друг от друга на расстоянии 350мм, выполненных из огнеупорного бетона (см. рис.1).

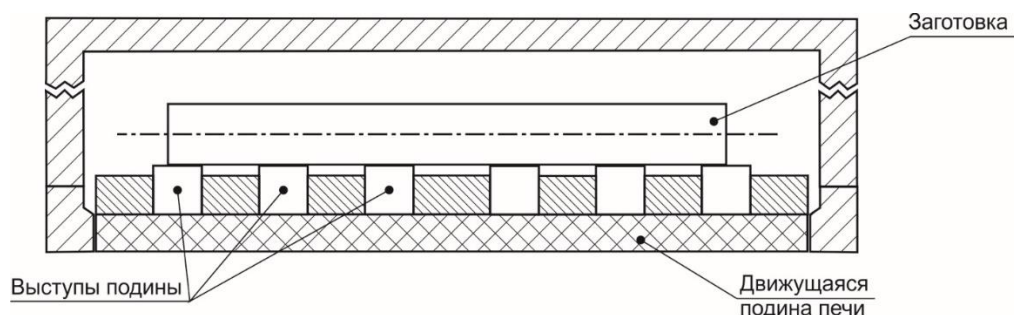


Рис. 1. Поперечный разрез печного пространства с модернизированной конструкцией подины

В качестве базовых режимов для моделирования нагрева с различной конструкцией подины были взяты характерный режим с производительностью печи: 60 т/ч (типовая по результатам эксплуатации печи в линии проката) Критерием получения удовлетворительных результатов нагрева является достижение к концу нагрева температуры всех участков заготовки не ниже $1280^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$

Результаты моделирования. Модель печи по длине была разбита на 12 расчетных участков. Каждый участок включает в себя 10 поверхностных и 2 объемные зоны. Каждая заготовка имеет 5 поверхностных зон, из которых 4 зоны соответствуют поду, верхней боковой части, нижней боковой части, своду заготовки соответственно, а одна зона моделирует одну или две торцевых поверхности заготовки. Отдельные зоны моделируют торцевые поверхности печи.

Результат моделирования каждой из температур поверхности зон представлен на рис. 2 для FVM-метода и на рис. 3 для зонального метода:

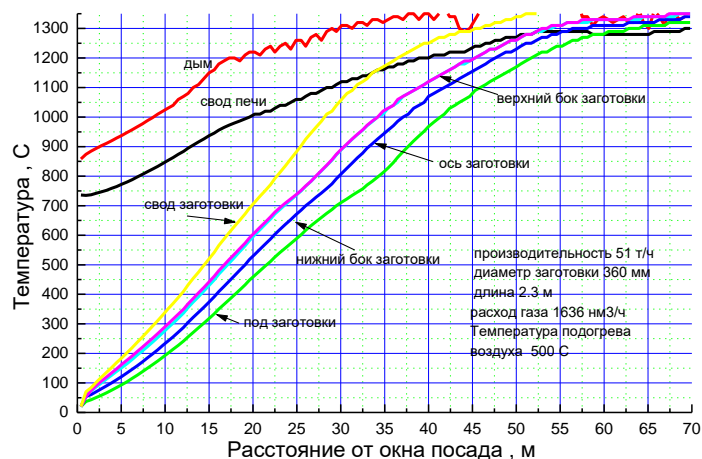


Рис. 2. Динамика нагрева различных участков заготовки, рассчитанная с помощью метода конечных объемов (FVM)

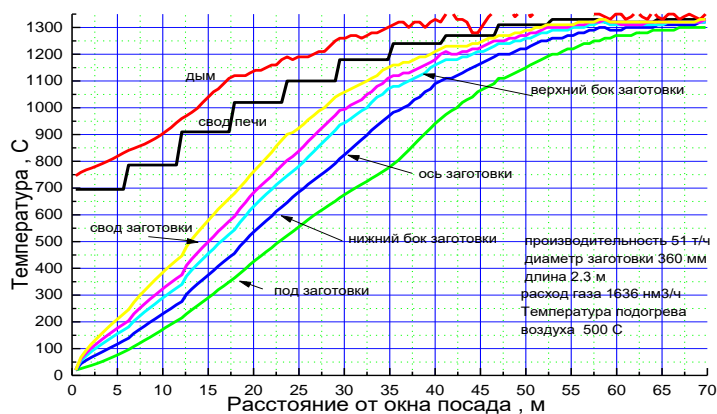


Рис. 3. Динамика нагрева различных участков заготовки, рассчитанная с помощью зонального метода

Из сравнения результатов работы двух методов видно, что точность вычислений для обоих методов сравнима и составляет не более 50°C (с достижением максимального расхождения для температуры печного дыма). Более мелкое разбиение ячеек в методе FVM позволяет получить уточненную информацию по температурам зон печи (например, для зоны свода печи, которая в зональном методе имеет ступенчатый характер из-за крупного размера зон). Так как состав печной атмосферы значительно изменяется в зависимости от зоны печи, требуется динамическое перевычисление коэффициента поглощения излучения. При этом можно отметить, что при динамическом вычислении коэффициента поглощения для ячеек методом EWBM общее время выполнения FVM метода превышает время моделирования зональным методом на 34 с. Если же динамическое вычисление коэффициента поглощения не используется, результаты моделирования методом FVM не соответствуют физическому процессу нагрева и не позволяют получить адекватные данные при моделировании.

Заключение. В работе были проанализированы два метода математического моделирования теплообмена излучением: метод конечных объемов и зональный метод. Была построена геометрия выбранного объекта моделирования – кольцевой нагревательной печи с вращающимся подом для нагрева непрерывнолитой заготовки.

В результате моделирования методы FVM и зональный показали сопоставимую точность моделирования (расхождение не превышает 50 °C). Время моделирования методом FVM превышает время выполнения зонального метода на 13 % ввиду требования вычисления коэффициента поглощения для каждого из выделенных объемов.

Список использованных источников

- 1 Modest M.F. Radiative Heat Transfer. Second Edition, Academic Press, New York, 2003. Book.
- 2 Lockwood F.C., Shah N.G. A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures // Eighteenth Symposium on Combustion. 1981. The Combustion Institute. Pittsburgh. Pp. 1405-1412.
- 3 Lisienko V.G. Improvement and efficiency energy technologies and industries (integrated energy-technological analysis: theory and practice). – M.: Teplotekhnika, 2008. – 608 p.
- 4 Lisienko V.G., Zhuravlev A.Yu., Kataev B.I. Analysis of the local characteristics of external high temperature heat exchange in flame furnaces // Izvestiya Vuzov. Iron and steel. 1973. No. 6. – Pp. 131-135.
- 5 Malikov G., Lisienko V., Viskanta R., Titaev A. New method for direct exchange area calculation in zonal method of radiant heat transfer modeling in combustion furnaces // IMECE2014-36983. Pp. 1-6.
- 6 Toporov V.A., Gubin Yu., Shipunov M.A., Lisienko V.G., Zasukhin A.L. Patent for useful model RU 128301 U1 “Device bottom annular heating furnace (priority of 12.11.2012).